



TITLE:

<大学の研究・動向> マイクロ波による無線電力伝送研究

AUTHOR(S):

橋本, 弘藏; 篠原, 真毅; 三谷, 友彦

CITATION:

橋本, 弘藏 ...[et al]. <大学の研究・動向> マイクロ波による無線電力伝送研究. Cue 2007, 17: 6-10

ISSUE DATE:

2007-03

URL:

<https://doi.org/10.14989/57913>

RIGHT:

マイクロ波による無線電力伝送研究

工学研究科 電気工学専攻 電波工学協力講座マイクロ波エネルギー伝送分野

生存圏研究所 中核研究部 生存圏開発創成研究系 生存圏電波応用分野

教授 橋 本 弘 藏

kozo@rish.kyoto-u.ac.jp

助教授 篠 原 真 毅

shino@rish.kyoto-u.ac.jp

助手 三 谷 友 彦

mitani@rish.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

当研究室が所属している生存圏研究所は、人類の生存に必要な領域と空間を「生存圏」としてグローバルにとらえ、その状態を正確に「診断」するとともに、それに基づいて生存圏の現状と将来を学術的に正しく評価・理解し、さらにその生存圏の「治療・修復」を積極的に行うことを目指した研究を行うことを目的として平成16年に発足した。「生存圏」は、「宇宙圏」「大気圏」「森林圏」「人間生活圏」の4つの圏から成り立つとして捉えられている（図1）。

生存圏研究所では、問題解決型の研究の柱「ミッション」を設定して分野横断的な研究を推進している。これらは「環境計測・地球再生ミッション」、「太陽エネルギー変換・利用」、「宇宙環境・利用」、「循環型資源・材料開発」の4ミッションである。当研究室は「太陽エネルギー変換・利用」、「宇宙



図1. 生存圏研究の概要

環境・利用」、「循環型資源・材料開発」の各ミッションにマイクロ波応用技術でコミットしている。

本研究室では特にマイクロ波を用いた無線電力伝送、ワイヤレス給電の研究を推進しており、数十年後には宇宙空間で超大型の太陽電池パネルを広げ、太陽光発電によって得られる直流電力をマイクロ波に変換して地上で利用する発電所SPS (Solar Power Satellite/Station) の実現を目指している。しかし、SPSは非常に巨大な宇宙システムであるため、その実現までに様々な基礎研究を行わなければならない。そこで当研究室ではSPSに至る研究段階を以下のように3段階に分け、地上応用研究を推進している。

- 1st Step：RF-IDやセンサー給電といった、現行法下での通信と同程度の強度のマイクロ波を用いた無線電力伝送や比較的弱い電力によるユビキタス電源等。
- 2nd Step：共用/専用周波数帯を用いたフェーズドアレーを用いた近/中距離の無線電力伝送。飛翔体、ロボット、電気自動車等、有線で不可能な電力伝送
- 3rd Step：専用周波数を用いた長/超長距離の無線電力伝送。SPS等

2. 1st Step：ユビキタス電源

過去のマイクロ波電力伝送実証は1対1の送電を基本としていた。しかし、無線であるという特徴を生かしたもう一つの応用として当研究室が提唱する「ユビキタス電源」がある。近年のIT技術及びデジタル機器の発展により、生活の至るところにIT機器が存在し、便利に情報がやりとりできる社会、いわゆる「ユビキタス情報化社会」の到来が間近であると言われている。IT機器への給電に関しては、現状では、バッテリーによる給電が主流であるが、充電器の待機電力、使い捨てとなるバッテリーによる環境負荷の増大、充電器が機器ごとに異なり必要以上に生産されるといった問題を抱えている。そこで提唱されたのが無線により給電するシステム、「ユビキタス電源」である。「ユビキタス電源」とは、弱い電磁波を用いて電力伝送を行い、ある空間の至るところでIT機器をバッテリーレスで駆動、コードレスで充電することのできるシステムである。このユビキタス電源を実現した空間を「無線電力空間」と呼ぶ(図2)。基本的に人がいる場所でのユビキタス電源であるため、人体に対する安全基準である $1\text{mW}/\text{cm}^2$ 以下の空間となるようにしなければならない。この安全基準は熱効果を中心に決定されたものである。受電電力は最大でもその点での電力密度×受電有効開口面積であるため、携帯性を高める場合にはそんなに大きな電力を得ることはできない。しかし、近年の携帯機器の省電力化は急速に進んでおり、太陽電池のように室内外の場所や昼夜による変動のないユビキタス電源は今後有望と考えている。

図3は2.45GHz、150W程度のマイクロ波で約 $5.8\text{m} \times 4.3\text{m} \times 3\text{m}$ のシールドルームを無線電力空間として実施した携帯電話の充電実験の様子である。FDTDによるシミュレーション及び実験にて部屋中がほぼ均一な $1\text{mW}/\text{cm}^2$ のマイクロ波密度となることを確認し、デュアル偏波レクテナ5並列接続で市販の携帯電話の充電に成功した。送電システムには経済性を考慮してマグネトロンと導波管スロットアンテナを用いた。受電整流システムはレクテナと呼ばれるアンテナ+整流回路である。

ユビキタス電源は、いつでもどこでも、である以上、 $1\text{mW}/\text{cm}^2$ 以上のマイクロ波密度を用いることは難しい。そのため、この密度と持ち

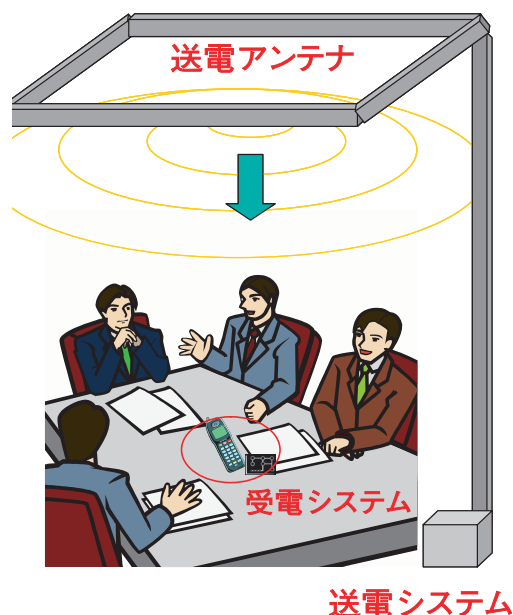


図2. ユビキタス電源(無線電力空間)の概念図

運べるレクテナの面積で決まる出力電力レベルがW級以下となり、それ以上の所用電力が必要な機器はバッテリーとの組み合わせを考える必要がある。ICやセンサー等、所用電力が更に小さなデバイスに関しては無線電力伝送のみの動作も可能であり、その代表はパッシブRF-IDである。RF-IDは現在900MHz帯での普及が進みつつあり、数mの無線電力伝送を利用している。マイクロ波電力伝送は今後様々なセンサー等へ応用が拡大していくことが期待されている。

ユビキタス電源の課題は弱電力で高効率動作するレクテナの開発である。レクテナは通常ショットキーバリアダイオードを用いて整流を行うが、ダイオードの立ち上がり電圧よりも低い

入力に対しては高効率の整流を行うことができない。現在入手可能なゼロバイアスダイオードは他のパラメータがレクテナに不向きで高効率化には成功していない。本研究室ではマイクロ波回路の改良によりショットキーバリアダイオードを用いた弱電力高効率レクテナの研究開発を行い、5.8GHz、1mW入力で50%以上、2.45GHz、0.1mWで50%前後の高効率を実現した。これは既存のパッシブRF-IDに用いられているレクテナよりも格段に高効率となっている。

また逆に、人が立ち入れない範囲、例えば床下、ガス管中、人立ち入り禁止の工場内等であれば1mW/cm²の安全基準は技術的な縛りではなくなり、電力密度を送電/受電機器の許容限界まであげることができる。現在建物内の床下の空間を利用した無線配電システムの研究も行っており、電気配線工事の省略による初期投資の削減メリットと電気配線改修工事費の削減メリットが得られる新しい電気配線設備として提唱し、外部資金を得て研究を行っている。

3. 2nd Step：フェーズドアレーを用いた無線送電

現在我々が実験しているユビキタス電源ではマイクロ波の密度分布やビーム方向を動的に変化させることは行っていない。現在はレクテナがない領域へも均一なマイクロ波密度を形成し、その代わりどこへ行っても一定の無線電力が得られるようにしている。さらにマイクロ波電力伝送の効率を向上させるためにはレクテナ目標の位置を動的に認識し、その方向にのみマイクロ波電力を集中制御する必要がある。マイクロ波を集中制御すれば、2節で示した我々の実験と同じ効果を約21Wで得ることができることが計算上分かっている。

そのためにはフェーズドアレーアンテナが必要となる。特に電力伝送であるために高効率かつ安価なフェーズドアレーが必要であるが、現在のフェーズドアレーは非常に高価であり、そのために民生応用が遅れている。さらに動的な方向設定や移動体への無線送電を考えた場合、正確な目標追尾システムも必要となる。正確な目標追尾システムの一方式として、レトロディレク

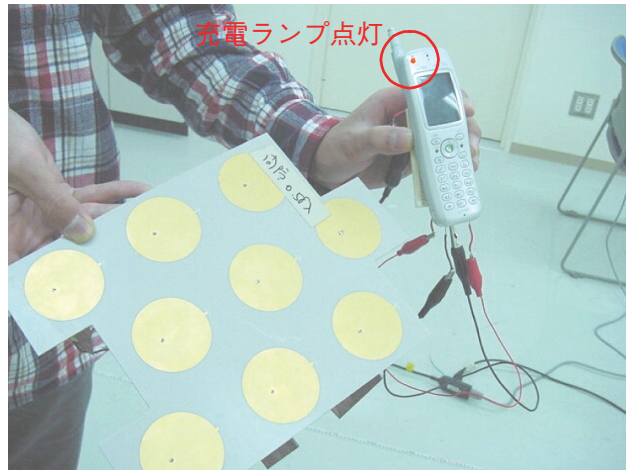


図3. 無線電力空間での携帯電話充電実験の様子 (写真左はレクテナ)

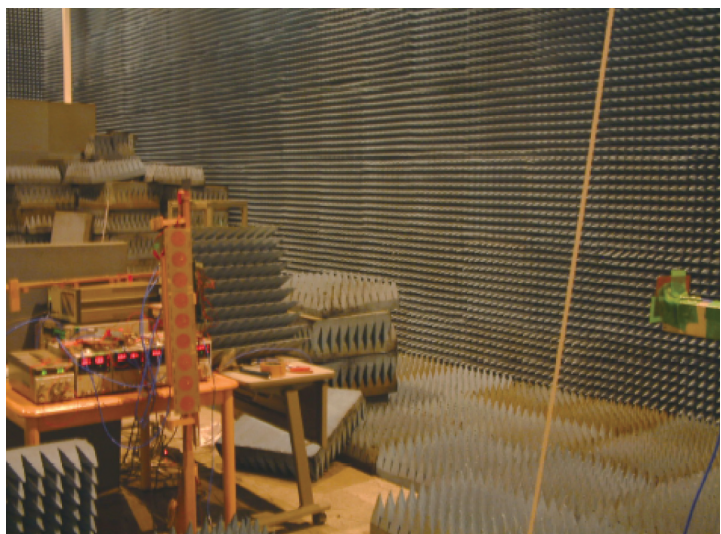


図4. 無線による到来方向推定実験の様子

タイプというパイロット信号を用いた目標自動追尾システムの研究を行っている。レトロディレクティブシステムにはハードウェア方式とソフトウェア方式があるが、本研究ではソフトウェア方式を用いたレトロディレクティブシステムを研究対象とした。ソフトウェア・レトロディレクティブは複数の受信アンテナで受信されたパイロット信号の位相情報を元にパイロット信号到来角を計算する。計算機によりパイロット信号の到来方向が正確に検出されなければならないが、実際に用いる機器にはその特性にばらつきが存在する。そのため、特性のばらつきによる誤差が到来方向に及ぼす影響を自動的に較正する自動較正到来方向検出法が必須となる。そこで、いくつかの到来方向検出自動較正法について実証実験を行い（図4）、その精度を検証した。また到来方向からのずれの要因である通過位相誤差、ノイズによる誤差の定量的分析を行い、誤差の影響を減らしたシステムの検討を行っている。

さらに、大規模送電システムのビーム方向制御や自動較正システムの研究、最終的にはSPSを目指した、これらの送受電システムを組み合わせたレトロディレクティブシステムの高精度化、スペクトル拡散されたパイロット信号を用いた雑音に強く、妨害波と識別が可能で複数方向からにも対応できるレトロディレクティブシステムの研究なども行なっている。

4. 3rd Step：宇宙太陽発電所SPS用軽量高効率マイクロ波送電システム

SPSは発電所であるため、売電により利益を得るためにそのシステムは安価軽量小型高効率である必要がある。しかし、現状のマイクロ波送電システム、特にフェーズドアレーシステムはまだまだ研究途上であり、効率も悪い。そこで本研究室では非常に安価で高効率な民生用マグネトロンに注目し、その放射マイクロ波の質の向上に関する研究を行っている。

マグネトロンは電子レンジに代表されるように主にマイクロ波加熱用として利用されているが、高効率・大出力・安価という長所を持つ反面、様々な周波数帯での雑音発生という短所を持つ。そこでマグネトロンの雑音発生源を解明し、最終的には低雑音マグネトロンを開発することを目的とした研究を行った。本研究では、マグネトロンを三次元的視点で解析するための基礎実験として、軸方向分割陽極マグネトロン（図5）の陽極電流測定、および実験結果にもとづいたマグネトロン内の電子軌道、特に軸方向の拡散運動について考察を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ・同軸二極管の場合、陽極電流の50%は陽極中央部に、30%は高圧入力側陽極に、15%はRF出力側陽極に、残りは陽極外装部にそれぞれ流れ、この電流分布は陽極電圧およびフィラメント電流には依存しない。
- ・マグネトロンの場合、陽極電圧が高いときは同軸二極管と同様の陽極電流分布が得られるが、陽極電圧が低減するにつれて高圧入力側への陽極電流が減少し、逆にRF出力側への陽極電流が増加する。

さらにこの民生用マグネトロンを用いて位相振幅制御マグネトロンの開発にも成功しており、この位相振幅制御マグネトロンを用いることでマグネトロン・フェーズドアレーの構築にも成功した。このマグネトロン・フェーズドアレーは安価高効率なフェーズドアレーであり、同時に電力の空間合成装置であるため、マイクロ波無線電力伝送以外にもプラズマ加熱や木材加工装置などへの応用も期待している。

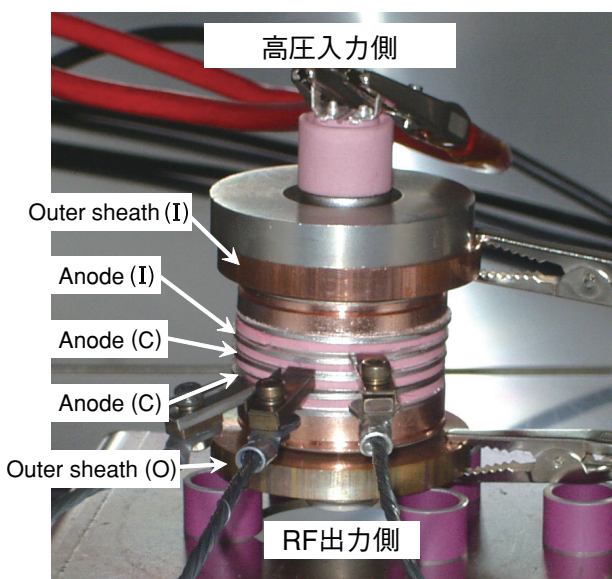


図5. 軸方向陽極分割マグネトロン

5. おわりに

当研究室で行っている研究は、マイクロ波を用いた無線での電力伝送という、これまでにない新しい電波で電力を送る研究である。情報が無線となり、ユビキタス情報社会が実現しようとしている今、残るくびきは電源ラインであり、電源ラインもすべて無線とすることで真のユビキタス情報社会の実現が可能となると考えている。現行法の下ではマイクロ波電力伝送はISMバンドでの実験局以外の実施が困難であるが、RF-IDのように弱い電力での無線電力伝送からスタートし、その利便性が広まればいずれ専用の周波数帯を得ることも可能であろう。SPSコミュニティからはITUへの働きかけも行っている。無線電力伝送がまず「人間生活圏」を豊かにし、将来は「宇宙圏」へと人類生存圏を拡大するために大きな貢献をなすことができるよう当研究室では努力している。

これらの研究・実験は当研究所の研究設備METLAB（電波暗室と周辺測定機器）を用いて行ったものである。METLABはマイクロ波に限らず、広く電波研究を実施できる実験設備であり、全国共同利用設備である。以下のwebに共同利用申請情報があるのでご利用ください。

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/metlab/>